

SYSTÈMES ET MODÈLES : QUELQUES REPÈRES BIBLIOGRAPHIQUES

Victor Host

L'étude bibliographique comparée fait apparaître la diversité des conceptions relatives aux systèmes et la polysémie du terme de modèle. De ce fait les deux concepts ne peuvent constituer la matrice commune des disciplines au cours de la transposition didactique. Mais les points de convergence des analyses sont importants pour le didacticien. La référence au système permet de situer la dissection analytique dont l'emploi exclusif tend à donner une idée caricaturale de la démarche expérimentale. La modélisation comporte des opérations intellectuelles communes dont l'explicitation est à la fois une exigence de rigueur disciplinaire et un facteur du développement cognitif.

Le foisonnement actuel des ouvrages relatifs aux systèmes et aux modèles est parfois déconcertant. S'agit-il d'un simple élargissement des méthodes de la science ou d'une révolution scientifique telle que la définit Kuhn ? Sur le plan de la pratique pédagogique la référence systémique conduit-elle à une perspective transdisciplinaire ou oriente-t-elle seulement la transposition didactique dans un domaine donné sans faire éclater les cadres disciplinaires ? L'analyse comparée de quelques ouvrages à orientation épistémologique ou didactique permet de dégager certaines implications relatives à la recherche pédagogique en sciences malgré la diversité des points de vue.

1. Robert KARPLUS. *Science Curriculum Improvement Study*. Chicago : Rand Mac Nally et C°. 1962.

(Curriculum destiné aux élèves de l'école élémentaire de 5 à 12 ans, traduction ; Montréal : Ed. Psychologiques).

La notion de système revient constamment en physique, principalement en mécanique et thermodynamique. Mais ce terme est introduit dans l'enseignement de façon incidente, en donnant lieu à des définitions "locales" sans métaréflexion sur la démarche intellectuelle impliquée. D'autre part de nombreux "objets" des physiciens comme le rayon lumineux, le point matériel, l'atome de Bohr sont en fait des modèles construits par l'esprit humain sans que cet aspect n'ait été explicité. Ces

lacunes contribuent à donner un aspect formel à l'enseignement de la discipline, à négliger l'approche qualitative précédant la mathématisation et à compromettre l'initiation précoce à la discipline.

Quand Karplus, chercheur connu en physique des particules, s'orienta vers la construction d'un curriculum scientifique pour jeunes enfants il décida de se centrer sur les concepts méthodologiques de base de la discipline. Pour lui le concept central de la science est celui d'interaction : tout phénomène, toute transformation peuvent être caractérisées par une relation entre les objets agissant les uns sur les autres. On évite ainsi d'attribuer les actions aux objets eux-mêmes et on supprime la dissymétrie entre cause et objet. La notion d'interaction détermine celle de système, l'ensemble des objets physiques qui interviennent dans une interaction donnée, par exemple l'interaction entre l'aimant et le clou.

La représentation mentale d'un système donné - l'auteur prend l'exemple d'un distributeur de friandises - conduit à un modèle qui fournit une explication possible de fonctionnement du système sans être nécessairement une copie exacte de la réalité : le modèle permet de coordonner les observations et de prévoir l'effet de certaines interventions. La progression proposée par le SCIS en physique porte successivement sur les objets matériels, l'interaction dans un système, les sous-systèmes et les variables, la relativité des positions et des mouvements, les sources et les transferts d'énergie, les modèles imaginés à partir de constructions mécaniques ou de circuits électriques. Le curriculum de biologie centré sur la notion d'écosystème n'est cependant pas fondé sur les cadres conceptuels définis en physique.

Pour l'auteur, la physique ne débute pas par la mathématisation mais par le dépassement de la pensée précausale fortement teintée d'anthropomorphisme. Il propose d'emblée une analyse des situations expérimentales qui élimine le sujet, l'événement et l'histoire pour situer les données dans un espace et un temps construits, pour exprimer la causalité et le déterminisme par des relations universelles et répétables. Les notions de système et de modèle permettent de définir les propriétés qui sont traitées ultérieurement par la mathématisation ; elles facilitent le dépassement des données de la perception immédiate pour définir les grandeurs fondées sur le principe de conservation : masse, énergie, quantité de mouvement, flux etc ; elles sont souvent matérialisées par la "boîte noire" qui transforme les flux.

Mais ce curriculum pose un certain nombre de questions. Peut-on construire directement ces concepts méthodologiques généraux à partir de situations expérimentales orientées de façon très directive pour réinvestir ensuite ce savoir procédural dans des situations d'apprentissage qui conduisent à l'acquisition d'un savoir déclaratif spécifique ? Suffit-il d'appliquer de façon quasi mécanique des règles méthodologiques pour éviter les blocages dus aux représentations anthropomorphiques et ar-

le SCIS propose une initiation à la physique centrée sur les concepts d'interaction, de système et de modèle

l'initiation scientifique peut-elle se faire à partir de situations imposées sans référence à l'environnement technologique de l'enfant ?

tificialistes des enfants ? Ne vaudrait-il pas mieux définir des concepts élémentaires comme ceux de dissolution ou d'air pour passer ensuite à une métaréflexion sur les opérations intellectuelles ? Ne pourrait-on pas s'appuyer davantage sur des activités techniques diversifiées pour introduire les activités de repérage et de mesure qui permettent d'élargir la perspective systémique ?

Dans quelle mesure la définition des systèmes et modèles proposée dans ce curriculum est-elle généralisable ? Pourquoi leur réutilisation dans le même curriculum en biologie est-elle limitée ? L'ouvrage de Von Bertalanffy, l'un des fondateurs de la théorie des systèmes fournira des éléments de réponse.

2. Ludwig VON BERTALANFFY. *Théorie générale des systèmes*. Paris : Dunod. 1973. Traduit par Jean-Benoît Chabrol.

Cet ouvrage présente une synthèse des publications de l'auteur qui s'étendent sur une durée de trente ans.

Deux problèmes ont orienté sa démarche vers une théorie qu'il qualifie de nouveau paradigme ayant conduit à une révolution scientifique telle que la définit Kuhn. D'une part les recherches de l'auteur en biologie théorique l'ont amené à chercher une problématique permettant de dépasser la controverse vitalisme-mécanisme. Il ne pense pas que l'orientation réductionniste classique puisse expliquer complètement la complexité des équilibres biologiques, l'emboîtement des structures dans un ordre hiérarchique, le développement de l'organisme avec ses régulations, l'évolution des espèces ; de façon générale les phénomènes d'émergence et de téléonomie. Il ne suffit pas de compléter la biologie analytique par la cybernétique et la théorie de l'information : une remise en cause épistémologique est nécessaire. Mais celle-ci ne consiste pas à admettre un principe organisateur de type anthropomorphique relevant du vitalisme et échappant à l'expérimentation.

C'est à l'intérieur de la science qu'il faut repenser le cadre de la causalité et du déterminisme, en substituant à l'explication par des chaînes causales linéaires indépendantes, une explication qui part des propriétés d'une totalité organisée, et qui prend en compte les problèmes posés par un grand nombre de variables en interrelation. D'autre part la théorie des systèmes ne concerne pas seulement la biologie. Elle a permis une rencontre entre spécialistes de nombreuses disciplines scientifiques, à une époque où leur cloisonnement croissant entrave la communication et freine la création de champs conceptuels nouveaux, qui se situent souvent à l'intersection de plusieurs disciplines. L'auteur ne pense pas que l'unité de la science se réalise à partir d'une conception réductionniste de la méthode expérimentale, fondée sur le postulat du déterminisme universel de Laplace ou

la théorie des systèmes permet de compléter l'analyse réductionniste en biologie par l'étude des propriétés d'une totalité organisée

elle contribue à réduire le cloisonnement disciplinaire par une analyse systémique qui permet de repérer les isomorphismes et de les traiter par des méthodes communes

sur le positivisme logique de Carnap, pour qui la science se reconnaît au fait que tous les énoncés peuvent s'exprimer en dernier lieu dans le langage de la physique, ou encore sur l'atomisme qui explique toutes les propriétés macroscopiques par addition de propriétés microscopiques. Pour lui, la progression vers l'unité de la science se fait par la recherche des isomorphismes entre les schémas conceptuels qui se rapportent aux différents aspects et niveaux de la réalité ; la théorie des systèmes définit les cadres qui permettent de repérer ces isomorphismes et de les mettre en œuvre. Elle s'appuie sur les deux fondements de la connaissance : la structure cognitive du sujet qui organise les données à partir d'un nombre limité de schémas et la structure objective du réel qui impose ses contraintes, même si la pensée scientifique admet parfois des représentations opposées. En comparant les principes fondamentaux de leurs disciplines respectives, les fondateurs de la théorie des systèmes ont retrouvé des algorithmes et des instruments conceptuels identiques bien qu'élaborés de façon indépendante.

L'étude des systèmes, c'est-à-dire d'ensembles complexes et organisés caractérisés par des variables interdépendantes, conduit à des concepts méthodologiques nouveaux par deux voies différentes : une approche logico-mathématique et une approche thermodynamique. La première n'est pas présentée de façon axiomatique et rigoureuse à partir d'un modèle général. D'ailleurs, en fonction de la relation qui lie la variation de la grandeur d'un élément à toutes les autres mesures, s'exprime dans la quasi généralité des cas par un système d'équations différentielles non résoluble même par calculatrice. L'auteur se limite à l'étude de cas particuliers pour montrer que l'évolution d'un système à variables multiples en interaction peut être très différente de celle qui a été supposée en additionnant l'effet de variables considérées comme indépendantes.

D'autre part, les mêmes modèles logico-mathématiques peuvent s'adresser à des systèmes concrets très différents. Par exemple l'évolution d'un système en fonction du temps peut se traduire par un équilibre stable ou instable, des oscillations périodiques, donner lieu à une croissance exponentielle ou logistique suivant la forme mathématique des données, indépendamment du phénomène étudié. La croissance relative de parties en compétition se traduit par l'équation allométrique qu'il s'agisse de revenus ou de la taille des cornes des ruminants. Quelquefois, une même transformation définie par les mêmes données, peut être calculée à partir de l'état initial dans une perspective causale ou à partir des valeurs terminales dans une perspective finaliste. Pour certains systèmes d'équations, la variation infime d'un paramètre peut provoquer une variation considérable de l'ensemble des facteurs. L'auteur fonde certaines propriétés fondamentales des systèmes biologiques et sociaux (comme la sensibilité, la centralisation des réponses...) sur certaines modalités de l'interaction, indépendam-

l'interaction des variables dans des systèmes concrets très différents peut s'exprimer par des modèles logico-mathématiques communs permettant de calculer l'évolution du système, le type de croissance etc...

ment des structures variées qui leur servent de support. Les isomorphismes ainsi définis se distinguent des analogies globales non calculables. De plus ils permettent de transférer l'expérimentation d'un système peu accessible sur un modèle qui représente un système bien maîtrisé.

l'évolution de la plupart des systèmes s'explique par la thermodynamique des systèmes ouverts

La référence thermodynamique permet à l'auteur de sortir du cadre formel des mathématiques. Il oppose les systèmes fermés évoluant vers un état d'équilibre vrai, caractérisé par une valeur minima de l'énergie libre et par l'impossibilité de fournir du travail à ce stade, et les systèmes ouverts susceptibles d'être maintenus de façon invariable à une certaine distance de l'état d'équilibre vrai, grâce à un flux continu de matière et d'énergie. Ces systèmes se rencontrent presque exclusivement en biophysique et en chimie industrielle. Ils sont caractérisés par une prédominance des réactions lentes, portant sur des composés riches en énergie et orientés par l'action des catalyseurs. Ils présentent quelques propriétés originales non prévues par la thermodynamique des systèmes fermés : par exemple, la possibilité d'évoluer vers un état improbable caractérisé par une organisation dynamique, et l'équifinalité, c'est-à-dire la possibilité d'atteindre un état final déterminé indépendamment des conditions initiales et du chemin parcouru. Ces aspects seront développés de façon beaucoup plus précise par Prigogine (cf. 4).

l'évolution des systèmes biologiques débouche sur une mécanisation progressive, caractérisée par le passage d'un équilibre dynamique à une organisation statique

Les derniers chapitres de l'ouvrage portent sur l'application de la théorie des systèmes dans différentes disciplines : biologie, sciences de l'homme et de la société, histoire. L'auteur développe surtout les exemples biologiques à partir de ses propres travaux. L'étude des régulations le conduit à distinguer deux temps dans l'évolution des espèces et le développement des organismes : les régulations traduisent d'abord l'équilibre biochimique dynamique dans un système ouvert, traversé par un flux qui sous-tend les caractéristiques générales du vivant : croissance, irritabilité, reproduction. Puis celui-ci se fige par mécanisation progressive en une organisation statique régulée par des mécanismes cybernétiques de rétroaction avec transfert d'information comme dans les systèmes technologiques. De larges développements sont consacrés au métabolisme (loi des surfaces) et à la croissance. Ils mettent en relief deux contributions importantes de la démarche systémique : le traitement mathématique des données conduit à expliciter des constantes ayant une signification empirique car elles peuvent faire l'objet d'une mesure directe ; une fonction complexe comme le métabolisme basal peut être calculée à partir d'un modèle simple liant quelques grandeurs d'état, sans prendre en compte l'extrême complexité des relations qui assurent l'équilibre à l'intérieur de la boîte noire constituée par l'organisme.

La théorie des systèmes telle qu'elle est décrite par l'auteur ne constitue peut-être pas une révolution scientifique, car elle ne remet pas en cause le postulat déterministe et l'explication causale. Mais elle permet de dépasser les formulations réductionnistes, qui ont certes permis le développement de la physique classique et sous-tendent le développement technologique,

la théorie des systèmes ne vise pas seulement à expliquer le fonctionnement des systèmes auto-organisés mais aussi leur développement

mais qui ne suffisent pas à expliquer les systèmes biologiques et sociaux car il est nécessaire de prendre en compte la véritable complexité des objets premiers de la science. La démarche expérimentale classique fondée sur le principe de raison suffisante - relation entre une cause et un effet, séparation des variables, vérification successive de chaque facteur par une démarche hypothético-déductive - apparaît comme une démarche préalable bien que nécessaire pour pouvoir définir les éléments du système qui devra être étudié dans sa globalité. L'extension de la théorie aux systèmes auto-organisés ne peut pas se limiter à une simple application de la cybernétique et de la théorie de l'information, en évacuant les problèmes du développement, de l'équifinalité, de l'antériorité de la régulation par rapport à la différenciation des appareils. Cependant, le didacticien éprouvera une certaine difficulté à traduire les principes posés dans la pratique de la classe. Les compétences transdisciplinaires proposées se rapportent le plus souvent à une modélisation mathématique alors que celle-ci n'est pas toujours réalisable en classe ; l'approche qualitative, en particulier sa traduction par les graphes, est négligée. L'étude des systèmes ouverts et des relations probabilistes est trop rapide pour déboucher directement sur une transposition didactique. L'aspect pédagogique de la pensée de von Bertalanffy sera repris dans l'exemple 3 et les travaux de Prigogine (exemple 4) permettront de mieux cerner l'apport de la thermodynamique à l'étude des systèmes.

**3. Horst BAYRUBER, Gerhard SCHAEFER,
Kybernetische Biologie. IPN. Einheitenbank.
Köln : Aulic Verlag 1978.**

l'étude de quelques problèmes concrets de biologie par l'analyse systémique conduit à une métaréflexion sur les instruments employés

Cette unité curriculaire à l'usage des enseignants du second cycle des lycées vise à compléter l'enseignement actuel de la biologie. Elle peut soit être fractionnée dans le cadre de l'enseignement obligatoire, soit faire l'objet d'un programme optionnel d'un semestre. Son contenu est plus large que ne l'indique le titre. Il répond à une double finalité : réaliser une meilleure approche de certains problèmes de biologie grâce au repérage et à la modélisation des systèmes impliqués, maîtriser les méthodes, les algorithmes et les concepts de la théorie des systèmes pour les appliquer à la vie quotidienne dans un environnement marqué par l'informatique. En particulier, les auteurs se proposent de faciliter le passage de la pensée linéaire, limitée à des relations cause-effet indépendantes, à la pensée systémique, caractérisée par l'analyse de réseaux d'interactions.

Pour réaliser ces deux objectifs, ils partent de problèmes précis de biologie, de physiologie, d'écologie ou de génétique, plus rarement de problèmes de physique ou de technologie. Les

données, éventuellement établies à partir d'une expérimentation, sont modélisées pour répondre à la question posée ; la signification des instruments conceptuels proposés apparaît clairement ; la métaréflexion sur les principes généraux suit l'étude d'exemples concrets. L'ouvrage ne se présente pas comme les cours de cybernétique destinés aux spécialistes, cours où les exemples ne servent qu'à illustrer ponctuellement une présentation formelle. La publication comprend des chapitres d'informations scientifiques, des fiches pédagogiques, des protocoles expérimentaux précis et pratiques, des fiches d'exercices et d'épreuves d'évaluation testées en situation de classe.

L'étude des auteurs se limite à l'analyse du fonctionnement de systèmes préalablement organisés. Ils distinguent des régulations directes entre éléments du système, sans transfert d'information, et les régulations indirectes, où une organisation assure le transfert de celle-ci.

Les premières sont modélisées à l'aide du diagramme sagittal. Grâce à la diversité des exemples, ils font apparaître la polysémie de la flèche et la variété des types de modélisation qu'elle exprime. Ils développent en particulier les modèles qualitatifs de régulation, en signalant les erreurs repérées dans la pratique de la classe. Citons les équilibres stables, les relations de concurrence ou d'équilibre instable, les cycles de croissance exponentielle ou d'autocatalyse. Par ailleurs, l'écriture algorithmique des diagrammes permet de raisonner sur la composition des corrélations par l'application de règles de déduction formelles.

Les régulations avec transfert d'information sont représentées par un modèle général, suivant des conventions normalisées en ce qui concerne la syntaxe, c'est-à-dire la nature des éléments et leur mise en relation. La sémantique est exprimée par les étiquettes qui donnent une signification concrète au schéma : cycle de régulation de l'eau, cycle de régulation thermique d'une grenouille ou d'une souris. La représentation des régulations s'appuie sur le modèle de la boîte noire. Celle-ci représente d'abord l'organisme entier, puis on la décompose en sous-systèmes considérés à leur tour comme des boîtes noires ; le programme de l'explication dévoile des sous-systèmes successifs emboîtés. La dernière partie de l'ouvrage est consacrée au transfert d'information. L'étude qualitative trop souvent négligée - distinction entre sémantique et syntaxe de l'information - précède l'étude quantitative. Le transfert de l'information est étudié avec précision dans le cas des organes des sens, depuis l'excitant jusqu'au système nerveux central en définissant les différentes grandeurs physiques impliquées dans la transmission : excitant, étages successifs du récepteur, axone, synapse.

Les concepts de base sont souvent introduits par des situations originales, mais susceptibles d'être effectivement réalisées, par exemple lorsqu'il s'agit de comparer l'énergie régulée à l'énergie qui sert de support au flux d'information. Les exercices d'évaluation portent sur l'analyse critique de diagrammes sagittaux.

les instruments de modélisation (diagramme sagittal, cycle de régulation) doivent être signifiants et employés suivant des conventions rigoureuses

l'analyse
proposée porte
uniquement sur le
fonctionnement
des systèmes mais
non sur leur
développement
et leur formation

sur la construction ou l'interprétation de cycles de régulation, sur la mesure et le transfert de l'information.

Cet ouvrage réalise en grande partie les ambitions des auteurs. Les démarches de modélisation proposées éclairent un certain nombre de domaines de la biologie (régulations de l'organisme, physiologie du système nerveux, dynamique des populations). On peut regretter qu'ils n'indiquent pas les limites de leur analyse : en assimilant les systèmes biologiques à des systèmes techniques, ils étudient le fonctionnement d'une organisation donnée, sans se préoccuper de son origine et de son histoire : or celles-ci conduisent à un développement de la théorie des systèmes (cf. Prigogine). D'autre part, cet ouvrage constitue une initiation opérationnelle à la pensée systémique. Il vise à la maîtrise effective de certains instruments dont les élèves peuvent saisir la fonction ; l'expérience et la formalisation sont en interaction. L'activité de modélisation proposée n'est pas une simple représentation ; elle développe une écriture algorithmique qui sert non seulement de support à une interprétation logique mais qui peut conduire à un traitement informatique des propositions.

4. Ilya PRIGOGINE, "La thermodynamique et la vie", *La Recherche* n°24. juin 1972. pp. 555-558.

Ilya PRIGOGINE et Isabelle STENGERS. *La Nouvelle Alliance*. Paris : Gallimard. 1979. (repris en coll. Folio-Essais).

Ilya PRIGOGINE et Isabelle STENGERS. *Entre le temps et l'éternité*. Paris : Fayard 1988.

les systèmes
dissipatifs sont des
systèmes ouverts
loin de l'équilibre

Les trois publications portent sur les mêmes thèmes, en apportant parfois des points de vue complémentaires. La généralisation de la thermodynamique à des systèmes ouverts loin de l'équilibre, conduit à définir des structures ayant des propriétés particulières : les systèmes dissipatifs. Ceux-ci permettent de donner une explication physique de l'ordre biologique dans le domaine des structures comme dans celui des fonctions. De plus, certains problèmes épistémologiques se trouvent renouvelés, comme ceux de la causalité, de la signification de la flèche du temps, des rapports entre l'homme et la nature. La première publication reste sur le plan d'une problématique purement physique ; les deux suivantes donnent une importance croissante aux recherches récentes et aux problèmes philosophiques. L'analyse développée ci-dessous se limite aux aspects qui concernent la notion de système.

Les recherches de Prigogine portent sur l'extension du deuxième principe de la thermodynamique. L'énoncé classique porte sur un système isolé, c'est-à-dire un système qui n'échange ni

matière ni énergie avec le milieu extérieur. Il subit une évolution irréversible vers un équilibre vrai caractérisé au niveau macroscopique par l'entropie maxima et au niveau microscopique par un désordre moléculaire maximum, par exemple l'équirépartition des molécules malgré de petites fluctuations (principe de Boltzmann). Les systèmes ouverts peuvent évoluer vers un état stationnaire différent d'un équilibre vrai, grâce à l'apport continu de matière et d'énergie, dont la néguentropie compense la production d'entropie au sein même du système. C'est le cas par exemple d'une chaîne continue de réactions chimiques. Lorsque ces systèmes ne sont pas trop éloignés de l'équilibre - dans ce cas, les variations d'une grandeur sont commandées par des fonctions linéaires des variables - le système paraît homogène, malgré les fluctuations microscopiques liées à l'agitation thermique.

Mais au-delà d'un seuil d'instabilité, l'homogénéité spatiale ou temporelle peut disparaître, au profit d'une organisation dynamique macroscopique entretenue par les échanges du système. L'exemple des courants de Bénard est souvent cité : lorsqu'on crée par chauffage un gradient vertical de température dans une couche horizontale de liquide, on observe à partir d'un seuil, le passage brusque du transport de chaleur par diffusion dans un liquide immobile à l'apparition d'une structure régulière de cellules de convection, dont l'organisation est entretenue par le flux de chaleur. Ces structures ont pour origine une fluctuation géante amplifiée et stabilisée par les échanges de chaleur. Les structures dissipatives peuvent être périodiques ou instables, et dans ce dernier cas, il existe des points singuliers pour lesquels le système peut évoluer vers plusieurs régimes fonctionnellement stables. Cette orientation est déterminée par la fluctuation déclenchante et non par des variables des grandeurs d'état, définies à l'avance par l'observateur : il s'agit du phénomène de bifurcation décrit par R.Thom. Il peut même s'installer un régime chaotique échappant aux descriptions déterministes macroscopiques ; la situation probabiliste a alors un caractère irréductible. Ces systèmes ont d'abord été simulés avec des calculatrices sur des cas relativement simples ; ils portent en particulier sur des chaînes de réactions comportant des interactions entre produits ou des phénomènes de transport. Quelques expériences de laboratoire ont confirmé directement ces résultats. Les lois de la thermodynamique ne conduisent pas nécessairement à l'uniformité, à la mort thermique ; elles peuvent aussi créer et entretenir une organisation et contribuer en particulier à expliquer les phénomènes de la vie.

En biologie, la thermodynamique généralisée permet d'expliquer à la fois l'ordre fonctionnel et l'ordre architectural. Sur le plan du fonctionnement actuel des organismes, elle apporte des instruments conceptuels qui manquent à la pensée analytique et réductionniste : le maintien de l'équilibre stationnaire malgré les perturbations aléatoires du flux de matière (en particulier la glycolyse a fait l'objet d'une modélisation sur

ils peuvent évoluer vers une organisation stable, périodique ou instable grâce à un flux continu de matière et d'énergie

la
thermodynamique
des systèmes
dissipatifs permet
d'expliquer les
caractères
fondamentaux
des systèmes
biologiques ainsi
que leur
apparition

calculateurs) ; l'existence d'oscillations entretenues (qu'il s'agisse du taux sanguin de glucose, de la polarisation de la membrane ou du comportement rythmique de populations de neurones). La genèse des notions d'information et de code est abordée de façon très sommaire. D'autre part la thermodynamique des systèmes dissipatifs permet d'expliquer le caractère fondamental des systèmes biologiques, qui ne se reproduisent et ne maintiennent leur identité que grâce à un flux continu de matière et d'énergie. La vie n'est pas l'oeuvre d'un démon de Maxwell luttant contre le deuxième principe de la thermodynamique, mais résulte d'une succession d'instabilités qui articulent fluctuations aléatoires et déterminismes. Cette succession est en grande partie inconnue car elle a été réalisée dans un contexte qui ne peut pas être reproduit actuellement. Des aspects très limités ont fait l'objet d'une étude expérimentale, par exemple l'organisation d'une colonie d'amibes en un plasmode à sporogone sous l'action d'une distribution inégale d'AMP cyclique. La thermodynamique ne permet pas de calculer à l'avance l'organisation concrète des structures en formation, mais elle explique les conditions de leur formation, la régulation du développement malgré la diversité des conditions et les incidents de parcours. Elle permet de comprendre l'étonnante variété des phénomènes d'organisation à partir d'une même situation initiale.

Les auteurs donnent une grande place aux problèmes épistémologiques. Pour eux, la thermodynamique des systèmes dissipatifs contribue largement à faire évoluer les notions de déterminisme, de causalité, de temps et modifie les rapports entre l'homme et la nature. Ils considèrent les paradigmes de la physique classique comme un cas particulier relevant des systèmes près de l'équilibre. Ils relativisent l'idée d'une nature automate, totalement prévisible et manipulable, l'idée d'un temps réversible, la conception de l'explication qui ramène le divers et le changeant à l'identique et au permanent et, dès lors, élimine l'histoire et la mémoire. Ils récusent l'idéal d'une compréhension du monde qui élimine complètement celui qui la décrit, qui fait de l'homme un étranger au cosmos et qui évacue toute référence à la relation que nous entretenons avec le monde.

tous les êtres
physiques sont
caractérisés par
une évolution
irréversible ; la
nature crée
constamment
des structures
actives

Les auteurs donnent une place considérable à la flèche du temps. Tous les êtres physiques sont caractérisés par un devenir irréversible, de l'étoile à l'atome. Ils insistent sur les limites du postulat de raison suffisante - une même cause dans les mêmes circonstances donne les mêmes effets - : on ne peut définir que des classes de situations alors que des différences fondamentalement non mesurables entre certains systèmes entraînent des évolutions totalement différentes ou des trajectoires différentes au cours du temps. Pour conclure, la thermodynamique n'explique pas seulement l'évolution de certains systèmes vers l'équilibre, mais elle permet de comprendre un caractère essentiel de la nature : la création incessante de structures actives et proliférantes.

Le lecteur ne partagera pas nécessairement les points de vue philosophiques des auteurs, mais il sera probablement séduit par les perspectives de recherche évoquées par la thermodynamique des systèmes dissipatifs, en particulier la perspective d'un élargissement du champ de l'explication scientifique au domaine de l'organisation de la régulation et de l'émergence de propriétés nouvelles. Le didacticien trouvera peu de repères pour la transposition didactique de nouveaux concepts, mais il retiendra surtout une mise en garde : il importe de dépasser une description purement mécaniste des systèmes biologiques et sociaux, description à l'image des systèmes technologiques, car l'étude de ces systèmes relève d'une thermodynamique généralisée longtemps ignorée des physiciens.

5. Jean-Louis LE MOIGNE. *La théorie du système général*. Paris : PUF. 1977. (2ème éd. 1983)

L'auteur réagit en tant que témoin du gâchis de l'informatisation et de la communication sociale. Il se propose d'aider les hommes d'action, ingénieurs ou travailleurs sociaux, à rationaliser leurs prises de décision, à partir d'une démarche qui centre leur activité d'analyse, de conception et de simulation sur un processus de modélisation, fondé sur un nouveau "Discours de la Méthode". Il récuse les bases logiques, épistémologiques et philosophiques des procédures traditionnelles et se réfère à R.Thom pour affirmer : "Il existe le contraste le plus évident entre une science pléthorique et la stagnation manifeste de la pensée scientifique vis à vis des problèmes centraux qui affectent notre connaissance de la réalité." Au discours cartésien fondé sur l'analyse, le dénombrement exhaustif, le passage du simple au complexe, il oppose les paradigmes fondés sur la modélisation des systèmes suivant un cadre général qui permet de repérer les isomorphismes. Il faut d'abord percevoir ses relations globales avec l'environnement : tout objet se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur et toute représentation est partisane ; l'explication première du comportement n'est pas le fait d'une loi impliquée dans une structure mais se situe par rapport aux projets du modélisateur, c'est-à-dire procède d'un choix pertinent et d'un dénombrement exhaustif.

D'autre part, l'auteur s'appuie sur les travaux de I. Prigogine et de H. Atlan, pour mettre en question l'orientation purement réductionniste de la pensée causale telle qu'elle est défendue par J. Monod. Il pense que le principe de raison suffisante (cf. 4) n'est pas applicable aux systèmes complexes. La référence à la thermodynamique des systèmes ouverts permet d'attribuer aux systèmes la possibilité de développer une organisation fonctionnelle et évolutive, de créer de l'ordre à partir du bruit, d'élever la complexité par la destruction de la redondance.

la rationalisation
des prises de
décision suppose
un nouveau
discours de la
méthode fondé
sur la
modélisation des
systèmes

un système est caractérisé par un projet et les processeurs qui assurent un fonctionnement et son évolution

tous les systèmes sont isomorphes d'un modèle formel universel "le modèle du système général"

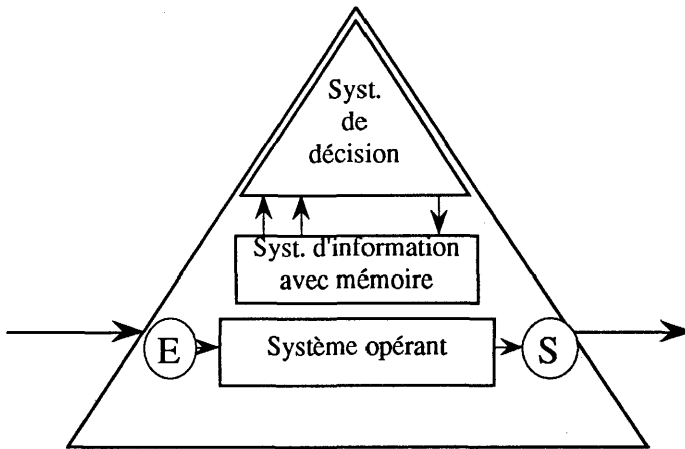
L'apport original de l'auteur - le seul qui soit évoqué ici - se rapporte aux procédures d'analyse du système et de modélisation qu'il décrit. Il récuse le point de vue ensembliste classique (un système est un ensemble d'éléments en interaction) pour le caractériser par son projet et son organisation. Celle-ci ne se limite pas à une structure, mais se caractérise par "*la capacité à produire et à se reproduire..., à maintenir et à se maintenir..., à devenir en fonctionnant et à fonctionner en maintenant son identité.*" La connaissance d'un système se traduit par sa modélisation qui se réfère à l'ensemble des actions exercées sur lui, et exprime les poussées du passé (déterminisme) comme la traction de l'avenir (finalité). Le processus de modélisation n'évince pas le modélisateur : au contraire, il est invité à expliciter ses choix et ses interprétations par la schématisation de son système de représentation. Le modèle construit est isomorphe d'un modèle formel universel, crée par la pensée humaine et appelé "modèle du système général". Il répond à la question de F. Jacob : "*Quelle dissection, demain, disloquera nos objets pour les recomposer en un espace neuf?*" La connaissance des objectifs du système détermine les frontières le séparant de l'environnement et la partition en un certain nombre d'unités actives. Ces unités ou processeurs ne sont pas définies par leur structure mais par leur fonction, c'est-à-dire par une combinaison de processus portant en particulier sur le transfert, le stockage et la transformation de matière, d'énergie, d'information, et répertés sur le tableau suivant :

TABLEAU DES PRINCIPAUX TYPES DE PROCESSEURS

Forme du processus / Objet du processus	Transport	Stockage	Transformation
Matière ou énergie	Ingesteur Injecteur Distributeur Extracteur	Stockeur Accumulateur	Destructeur Producteur Filtre Catalyseur
Information	Lecteur Récepteur Canal Emetteur	Mémoire Duplicateur	Codeur-décodeur Calculateur Régulateur

les processeurs
traitent soit de la
matière, soit de
l'information

Le modèle du système général est construit par la différenciation d'une boîte noire caractérisée par ses entrées et ses sorties ; la progression comprend neuf niveaux emboîtés. Il apparaît d'abord une boucle de régulation avec transfert éventuel d'information. Puis se différencie une capacité définie objectivement en termes de comportement. D'où la distinction entre un processeur de décision et un processeur opérant ; le premier se complique par un processeur d'information ayant pour support une mémoire - il caractérise le niveau sept représenté par le schéma ci-dessous. Les systèmes plus complexes, caractérisés par des capacités d'auto-organisation et d'auto développement, présentent un processeur de pilotage doué d'imagination et capable de définir ses finalités en interaction avec l'environnement.



la problématique
de l'auteur est
peu satisfaisante
du point de vue
de
l'épistémologie
des sciences

Le modèle proposé concerne en premier lieu les systèmes économiques et sociaux. Il met en évidence certaines exigences souvent négligées : la nécessité d'explicitier avec précision le projet organisateur du système et de procéder à une analyse qualitative rigoureuse avant la quantification ; le refus de réduire l'analyse du système à sa dimension technocratique : la hantise de l'unique trajectoire optima donnée par le calcul. Mais l'auteur étend aussi sa théorie aux systèmes biologiques et physiques. Il identifie les processus décisionnels aux processus aléatoires ; le développement et l'évolution définissent un projet. Même le principe de conservation en physique est analysé dans cette perspective : *"Le seul projet d'une pâte à modeler c'est de se conserver."*

En se limitant à un point de vue purement didactique on peut regretter la procédure employée par l'auteur pour modéliser tous les systèmes. Elle organise l'étude sur la réalisation d'un

mais convient à l'analyse des situations didactiques dans le cadre de l'Institution scolaire

projet éventuellement subjectif alors que l'initiation scientifique passe par l'effacement du sujet - même si on est amené à considérer cette éviction comme une exigence temporaire.

Même si l'on regrette la confusion épistémologique qui vient d'être évoquée, on a intérêt à retenir l'aspect pragmatique de cet ouvrage. Tout projet pédagogique traduit des finalités explicites ou implicites ; il est accepté ou refusé suivant les attentes de ceux qui le reçoivent. L'activité didactique se concrétise par des décisions successives, dont l'impact peut varier totalement suivant le système de relations où l'élève se trouve placé. Au fur et à mesure du développement d'un projet pédagogique, il peut paraître utile de modéliser les interactions entre les processeurs et de les présenter sous une forme évolutive, qui laisse une place à la création suivant les exigences de l'auteur. On limite ainsi les dérapages technocratiques dûs soit à l'absence d'évocation des finalités masquées, soit à une analyse systémique simpliste sur le modèle de la relation homme-machine. D'autre part, on adopte une stratégie de modélisation fondée sur un aller-retour incessant entre représentation et action.

6. Bernard WALLISER. *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse des systèmes.* Paris : Seuil. 1977.

l'étude des systèmes explicite les interactions qui fondent l'unité de l'objet étudié et facilite la communication entre scientifiques grâce à un langage unitaire

L'auteur définit l'étude des systèmes comme une approche cognitive qualitative qui précède la mathématisation proprement dite. Il ne prétend pas bâtir une théorie universelle des systèmes intégrant toutes les théories spécifiques des différentes disciplines et qui évacuerait le rôle de l'homme. Il vise à rendre opérationnelles les finalités qui sous-tendent le courant systémique sur le plan de la connaissance comme celui de l'action. Comment dépasser les tendances purement analytiques de certaines sciences, par une approche plus synthétique explicitant les interactions qui fondent l'unité de l'objet étudié (cellule par exemple) ? Comment promouvoir un langage unitaire qui facilite la communication entre scientifiques dans des domaines où des propriétés communes risquent d'être masquées par des langages différents ?

L'ouvrage aborde successivement les notions de systèmes et de modèle. Une analyse précise et exhaustive tend à expliciter les opérations intellectuelles qui sous-tendent les démarches et à démasquer les a priori épistémologiques et philosophiques implicites qui les orientent. L'étude des systèmes porte sciemment sur les relations de situation de causalité ou de finalité, qui permettent de les définir par rapport à l'environnement, sur les interactions entre sous-systèmes et systèmes, sur les modalités de leur évolution ou de leur régulation. Cette étude est faite avant tout à partir d'un point de vue logico-mathématique. Les systèmes ne sont pas présentés comme des objets de

l'expérience immédiate, mais comme des constructions formelles à partir d'une opération de séparation des variables. Pour un problème donné, un système se définit par un processus d'optimisation qui oppose des variables liées qui caractérisent celui-ci, à des variables plus indépendantes qui définissent l'environnement.

L'étude des modèles porte sur leur aspect syntaxique (mode de construction), sémantique (signification) et pragmatique. Sur le plan de la syntaxe l'auteur distingue les modèles de forme verbale, graphique ou mathématique. Il récuse la tendance à réserver ce terme à des constructions relativement formalisées, exprimées par des systèmes d'équations et traduites par des programmes informatiques, mais l'étude détaillée porte uniquement sur des formes logico-mathématiques de modèles. Les modèles matériels (maquettes, etc) iconiques et graphiques sont uniquement mentionnés ; le modèle verbal cité en biologie (les migraines ont souvent une cause biologique) est un exemple médiocre et un énoncé de peu d'importance.

la modélisation se caractérise par des va-et-vient successifs entre un champ empirique du travail sur les données et un champ théorique centré sur les procédures d'axiomatisation et de déduction

Du point de vue sémantique, l'auteur qualifie de modèle tous les produits de l'activité de représentation, y compris les définitions obtenues par des opérations de classement ou de généralisation de données empiriques et les fonctions mathématiques qui expriment des relations expérimentales sous forme de lois. La loi de Mariotte a le même statut que la molécule support de la théorie cinétique des gaz. Cependant l'auteur considère surtout le modèle comme un médiateur entre l'élaboration de la loi et la compréhension de celle-ci. Il analyse les modèles aléatoires comme les modèles déterministes. Ici encore l'accent est mis sur le processus de modélisation et non sur l'objet. Le processus se caractérise par des va et vient successifs entre un champ empirique de recueil et de traitement des données (manipulations, expérimentations...), qui permet par exemple de passer du modèle hypothétique au modèle confirmé, et un champ théorique caractérisé par des procédures d'axiomatisation et de déduction, qui induisent des projections conduisant à un nouveau modèle hypothétique.

Les cycles successifs permettent une explicitation précise entre le système et les modèles successifs, en éliminant les analogies superficielles et douteuses. D'autre part ils peuvent se traduire par des activités de simulation qui définissent une caractéristique essentielle des modèles. Ceux-ci peuvent être symbolisés par une fonction (f) qui lie les entrées, variables d'environnement (x) et de commande (u) aux variables de sortie (y). Le modèle est cognitif, prévisionnel, décisionnel, normatif suivant que la variable à déterminer est respectivement f , y , u ou x .

Ce livre présente un tableau concis et complet des problèmes rencontrés à l'occasion de l'analyse des systèmes et de la modélisation. Il est susceptible de rendre de grands services aux spécialistes appelés à traiter des ensembles complexes de données et qui seraient tentés, du fait de leur formation, à privilégier le formalisme logico-mathématique au détriment

l'ouvrage permet d'identifier et de situer les problèmes de didactique mais leur résolution implique des références plus précises à l'épistémologie des sciences

d'une approche heuristique, et qui seraient tentés de ce fait à donner un alibi scientifique à des décisions politiques et à négliger l'expérience des praticiens. Le didacticien des sciences peut être concerné lorsqu'il est confronté à des situations complexes qui font intervenir des aspects très divers de l'institution scolaire comme ceux qui sont liés au problème de l'introduction des sciences physiques dans les collèges. Mais la problématique développée dans cet ouvrage est souvent peu adaptée à des recherches plus focalisées en pédagogie des sciences. Les exemples cités par l'auteur illustrent une définition ponctuelle, mais ne permettent pas de maîtriser l'ensemble du processus. Le formalisme mathématique, parfois inutilement lourd, masque l'explicitation insuffisante des contraintes épistémologiques qui orientent l'analyse des systèmes et la modélisation dans les sciences expérimentales, et qui différencient la pensée scientifique de la pensée magique ou de la prise de décision dans le domaine socio-économique.

7. BILAN DE L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La comparaison entre les propositions relevées dans les ouvrages cités peut porter sur deux problèmes :

- quelles perspectives épistémologiques peut-on dégager de l'approche systémique ?
- quelles orientations pédagogiques peut-on proposer au niveau de l'enseignement général ?

7.1. Le point de vue épistémologique

Quel est le statut des notions de système, de modèle, d'analyse systémique dans la pensée scientifique ?

- Notion de système

Les systèmes décrits sont d'une extrême diversité :

- Les systèmes physiques comme le système solaire servent à repérer le support qui conditionne une transformation ; ils sont déterminés de façon rigoureuse.
- Les systèmes techniques comme le réfrigérateur sont caractérisés par une fonction technique, c'est-à-dire une finalité intentionnelle qui se réalise par une articulation de déterminismes.
- Les systèmes biologiques comme le système régulant le taux de glucose sanguin déterminent une fonction biologique de régulation ou d'adaptation nécessaire au maintien de la vie ou à son extension. Un faisceau de déterminismes physico-chimiques peut s'interpréter comme la manifestation d'une finalité de fait, produit d'une histoire.

- Les systèmes économiques et sociaux réalisent un projet implicite ou explicite dans un contexte caractérisé par la communication sous forme symbolique, les prises de décision, l'existence de lois susceptibles de changer avec le système.

Mais trois familles de problèmes ont conduit à la recherche des éléments de convergence à travers la diversité des situations :

- la nécessité de ne pas étouffer, par la dissection analytique, l'étude des problèmes nés de la complexité "*du grouillement merveilleux mais intelligible des interactions*" (Le Moigne). L'analyse ne donne pas à elle seule la réponse aux problèmes complexes posés,
- la nécessité de réagir contre une tendance dominante de la science actuelle, tendance qui conduit à la spécialisation croissante, à l'éclatement en disciplines de plus en plus cloisonnées. Cette tendance tend à bloquer la communication et la création de champs conceptuels nouveaux. Par l'approche systémique, "*des spécialistes... éloignés les uns des autres se trouvent subitement au coude à coude et en possession d'un formidable appareil conceptuel dont ils découvrent progressivement qu'il constitue pour eux un langage commun*" (Levy-Strauss),
- la nécessité de fonder les décisions de la vie économique et sociale sur une analyse de l'ensemble des variables et non sur une intuition subjective et partielle. Le développement des méthodes de programmation et des instruments de calcul suppose le développement d'un appareil conceptuel qui les situe par rapport à leur finalité ou leur signification.

L'étude comparée ne permet pas de dégager une définition exhaustive des systèmes, mais conduit à articuler deux points de vue complémentaires, analytique et globaliste. Le premier définit les systèmes comme des ensembles d'éléments en relation, et le deuxième détermine le système par rapport à l'environnement en fonction d'un principe organisateur ou d'un projet qui lie un certain nombre de variables. Le système se distingue d'un ensemble quelconque parce que l'articulation des éléments crée des propriétés nouvelles : Par exemple, en associant un poids et un ressort on crée un pendule, c'est-à-dire un système oscillant. Un système ne s'identifie pas à un objet réel même s'il en porte le nom. Sa définition fait toujours intervenir le choix d'un observateur qui abstrait certaines propriétés ; de ce fait il représente une classe d'objets et désigne les isomorphismes qui les réunissent. Le plus souvent le système ne désigne qu'un objet formel, c'est-à-dire une création de l'esprit.

- Notion de modèle

Le terme de modèle présente une polysémie marquée, parfois chez le même auteur. Au sens large, il définit toute activité de représentation, quelle que soit la nature des opérations intellectuelles réalisées : définition (espace), loi (loi des gaz parfaits),

quelles
convergences y
a-t-il entre les
systèmes
décisionnels des
sciences sociales
et les systèmes
déterministes des
sciences de la
nature ?

reconstruction conceptuelle (cellule). L'idée implicite des tenants de cette conception c'est que l'activité scientifique porte sur des objets construits par l'esprit humain et qui doivent être reconstruits au fur et à mesure du développement de la science.

Au sens étroit le terme de modèle désigne toute représentation matérielle, iconique ou symbolique faite en vue d'une explication, c'est-à-dire, qui reproduit certains aspects de l'objet étudié pour comprendre son fonctionnement et déduire des propriétés nouvelles (par exemple, le modèle de courant électrique). L'analyse des systèmes vise à construire un modèle explicatif et à l'utiliser au cours d'activités de simulation, lesquelles permettent de prévoir l'évolution du système et qui conduisent éventuellement à un remodelage du modèle.

Deux aspects de la modélisation sont développés le plus souvent par les auteurs :

- Il est nécessaire de déterminer avec précision les isomorphismes, c'est-à-dire les correspondances terme à terme entre le système et le modèle qui le représente. Alors que les rapprochements fondés sur des analogies globales conduisent le plus souvent à des impasses, les relations d'isomorphisme permettent des inférences et des calculs susceptibles d'être réinvestis dans le système.
- Un modèle peut être défini par deux procédures différentes : il peut être construit progressivement par induction et comparaison de données empiriques (modèle de la cellule) ; au contraire il peut être posé de façon axiomatique et donner lieu à des déductions faisant l'objet d'un contrôle expérimental (modèle moléculaire dans la théorie cinétique des gaz). Pour Walliser en particulier, l'articulation des deux procédures permet d'effectuer des aller-retours successifs entre le champ empirique et le champ théorique. On évite ainsi de rigidifier le modèle en un objet statique et stérile ; de plus cette procédure conduit éventuellement à établir la pluralité des modèles.

• Approche systémique et démarche expérimentale

Pour certains auteurs, l'approche systémique marque une rupture avec la pensée scientifique traditionnelle : elle constituerait une révolution scientifique (von Bertalanffy) ; elle exprimerait un nouveau "discours de la méthode" (Le Moigne) ; elle permettrait de dégager une matrice commune à l'intérieur de laquelle se différencieraient les différentes disciplines ; elle substituerait au déterminisme réductionniste de la science traditionnelle une approche qui intègre l'activité créatrice du sujet et éventuellement de la nature (Prigogine, Atlan, Morin).

La position de Walliser paraît plus réaliste : l'analyse systémique ne conduit pas à une théorie universelle qui supprimerait les théories spécifiques. Elle ne se substitue pas à la méthode expérimentale décrite par Claude Bernard, mais elle la complète, l'intègre et permet d'articuler déterminisme et finalité. Elle rapproche les disciplines parce qu'elle fait apparaître les

un modèle risque de se dégrader en objet dogmatique sans la simulation qui permet de le rectifier et de le reconstruire

l'analyse des systèmes se situe de façon différente par rapport à la démarche expérimentale suivant le domaine étudié

propriétés communes aux organisations complexes et parce qu'elle explicite la signification théorique et la valeur opératoire de concepts analogues dans différentes disciplines. Elle donne un objectif et une signification aux techniques de programmation et de calcul qui se développent rapidement aujourd'hui.

Suivant le domaine exploré et le problème posé l'approche systémique se situe de façon très différente par rapport aux méthodes expérimentales classiques de type analytique.

A un premier niveau, développé par Karplus, la notion de système ne sert qu'à préciser la démarche expérimentale traditionnelle. En limitant celle-ci à la démarche hypothético-déductive (vérification d'hypothèse) et à la séparation des variables, on valorise des procédures déjà employées pour la résolution de problèmes pratiques (recherche de pannes par exemple) et on occulte les opérations intellectuelles qui marquent le passage du réalisme naïf à la pensée causale. Il s'agit de passer de l'événement complexe et subjectif, situé par des corrélations plus ou moins aléatoires dans une flèche du temps vécu ou généralisé sous la forme d'une règle pratique, au fait scientifique localisé dans un espace-temps universel réversible, et à la relation causale reproductible et détachée du sujet.

en physique elle vise à donner plus de précision et de rigueur à une démarche déterministe de type réductionniste

Deux principes caractérisent les opérations intellectuelles assurant cette évolution. D'une part, la notion d'interaction entre deux éléments tend à effacer la dissymétrie entre la cause et l'effet (exemple étude du choc de deux particules) ; elle n'attribue pas le changement aux propriétés intrinsèques des objets mais aux relations qui les lient. D'autre part, une transformation ne peut être décrite sans référence à la conservation d'une grandeur (masse, énergie, éléments, quantité de mouvement, charge électrique, flux...).

La notion de système sous-tend de façon au moins implicite celle d'interaction. Elle doit être dégagée de façon explicite lorsqu'on applique le principe de conservation. Mais elle n'est établie que de façon locale et incidente sans métaréflexion sur l'opération intellectuelle qui pourrait s'exprimer par la proposition suivante : il s'agit de réduire les systèmes complexes à une somme de systèmes à deux éléments caractérisés par des relations d'interaction et de conservation. Dans ce cadre, la notion de système peut servir de support à des explications purement réductionnistes, en particulier celle qui ramène l'explication ultime de tous les phénomènes à des relations entre grandeurs physiques. Ces systèmes élémentaires sont souvent matérialisés par les appareils très particuliers que l'on trouve dans les laboratoires de physique.

Mais en général, les systèmes complexes présentent des propriétés d'intégration nouvelles, non réductibles à celles des composants pris isolément. Un deuxième niveau de l'analyse des systèmes, étudié en particulier par von Bertalanffy, s'efforce de déterminer ou de calculer les effets de l'interaction des variables. Des systèmes matériels très différents peuvent être exprimés par un même modèle mathématique, et par suite,

présenter des propriétés communes, par exemple le même type d'évolution dans le temps : (croissance exponentielle ou sigmoïde, oscillations périodiques ou amorties, évolution vers un équilibre). L'interaction se manifeste parfois par des propriétés imprévues comme l'équifinalité et la sensibilité déjà décrites (cf von Bertalanffy). Certaines études peuvent porter sur le fonctionnement global du système sans qu'il soit nécessaire d'analyser chacune des multiples réactions élémentaires qui déterminent ce comportement (par exemple, rapport entre les populations d'un écosystème et le flux de matière et d'énergie). Les systèmes de ce type sont déterministes, mais leur étude se distingue de celle des systèmes du premier niveau par les postulats suivants :

- Les objets premiers de la science sont complexes. Ils constituent au départ une boîte noire, délimitée par rapport à l'environnement, et que l'on démonte progressivement. Le réductionnisme de Laplace est illusoire.
- Les systèmes de ce niveau sont définis par une organisation dont on n'explique pas l'origine (êtres vivants) mais dont on caractérise le fonctionnement. Il se définit souvent par un équilibre dynamique. Il s'agit de systèmes ouverts qui maintiennent une organisation improbable grâce à un flux de matière et d'énergie qui s'oppose à l'évolution du système vers l'entropie maxima, c'est-à-dire le désordre.

dans d'autres domaines, en particulier en biologie, elle postule la complexité des objets premiers de la science et analyse les propriétés nouvelles résultant de l'organisation en particulier d'un système de régulation

Le maintien du système est lié à des activités de régulation. Celle-ci peut résulter du simple jeu des interactions qui définissent le système comme la régulation du pH dans le cas d'une solution tampon. Dans d'autres cas la régulation est assurée par rétroaction, grâce à une organisation spécifique de feedback qui définit un troisième niveau.

Les systèmes de ce troisième niveau relèvent des domaines technologique, biologique ou social. A ce niveau d'analyse ils sont conçus à la manière des systèmes techniques, c'est-à-dire comme des organisations exprimant un projet - fut-ce celui du maintien de la vie. La régulation et l'adaptation impliquées par ce projet sont réalisés grâce à un sous-système spécifique fondé sur un transfert d'information. Par son organisation, le flux d'information est déterministe. Il se réalise grâce à un flux d'énergie - en général très faible - qui relie la sortie du système à l'organe effecteur. Mais ce flux doit être rendu significatif par des opérations de codage et de décodage qui relèvent de la logique de l'intention. L'analyse systémique du troisième niveau - celle des cybernéticiens ou des spécialistes de la théorie de l'information - ne prend en compte que l'aspect déterministe de la communication ; sa signification et son origine échapperaient à la science qui ignore le démon de Maxwell.

Par contre, un certain nombre de penseurs - Prigogine, Morin, Atlan - refusent d'admettre que la téléonomie (finalité de fait) dans la nature est une illusion ou le résultat d'un événement totalement imprévisible. Ils considèrent l'auto-organisation comme la propriété intrinsèque de certains systèmes dont

peut-on assimiler
les systèmes
techniques et
sociaux produits
par l'intelligence
humaine aux
systèmes auto-
organiseurs
produits par
l'évolution
biologique ?

l'étude définit un quatrième niveau. La thermodynamique des systèmes ouverts ne postule pas leur évolution irréversible vers des équilibres statiques, le désordre et la mort, mais prévoit des possibilités de fluctuations amplifiées et stabilisées : la nature manifeste constamment des propriétés de création et de "jeu" que l'on croyait réservées à l'intelligence humaine. L'exemple classique de cette propriété est celui des courants de Bénard déjà évoqués (Prigogine). Par ce caractère, les systèmes vivants se distinguent des systèmes techniques. Une histoire est jalonnée de fluctuations qui les font passer des formes d'interaction globale sans support spécifique différencié de régulation à des structures de rétroaction de plus en plus complexes. Cette mécanisation progressive augmente l'efficacité de la régulation dans des directions déterminées, mais limite la souplesse de l'adaptation.

7.2. Le point de vue didactique : quel intérêt pédagogique présente la problématique présentée dans les ouvrages cités ?

- Une lecture superficielle peut conduire à deux impasses

Elle favorise l'idée que l'étude des systèmes exige des instruments logico-mathématiques sophistiqués et qu'elle relève de ce fait du domaine des spécialistes.

Elle se limite à une vulgarisation portant sur les résultats de l'étude des résultats, étude faussée par des analogies douteuses ; cette procédure tend à masquer les objectifs et les hypothèses qui sous-tendent les conclusions.

En fait il est possible de dégager de ces ouvrages un certain nombre d'objectifs réalisables dans le cadre d'une première approche de l'étude des systèmes :

- élargir les procédures de la démarche expérimentale pour dépasser une épistémologie naïve limitée à la séparation des variables,
- construire, en liaison avec d'autres disciplines (économie, géographie), les instruments élémentaires de l'analyse systématique et de la modélisation, pour maîtriser et donner un sens aux procédures de collecte et de traitement des données, qui prennent une place de plus en plus importante dans notre environnement quotidien,
- faciliter le dialogue expert-novice, rendu de plus en plus difficile par la complexité des situations et l'évolution rapide des techniques. Le mode de pensée des spécialistes échappe souvent aux exécutants faute de formation générale. Inversement les premiers laissent échapper des variables significatives et traitent parfois des nombres sans rapport avec l'expérience.

- Les différentes étapes de l'approche systémique peuvent être dégagées par une métaréflexion sur les activités scientifiques, orientée par les ouvrages cités

au lieu d'imposer une étude formelle des systèmes, de la cybernétique et de l'information, il y a intérêt à dégager les concepts fondamentaux à partir d'une métaréflexion induite par des activités scientifiques concrètes

La prise en charge par l'élève des opérations intellectuelles dégagées constitue une école de rigueur.

L'approche débute par l'identification du système : quel problème ou projet permet de le définir et de préciser ses rapports avec l'environnement ? La prise en compte des systèmes du premier niveau permet d'articuler l'ensemble des opérations intellectuelles nécessaires à la définition d'une relation causale ; en fonction des grandes lignes du développement cognitif défini par Piaget, les élèves sont amenés à distinguer les différentes formes de corrélation et à diversifier les méthodes permettant d'identifier les déterminismes : méthodes classiques et méthodes statistiques. Les ouvrages cités présentent de nombreux guides pour l'étude des systèmes complexes (Schaefer, Le Moigne, Walliser) qui s'appuient sur des éléments communs à l'ensemble des systèmes : boucles, réseaux, flux, réservoirs.

L'étude analytique débouche sur une synthèse, la construction et la modélisation du réseau d'interactions. La première représentation du système se traduit souvent par le modèle de la boîte noire et sa décomposition en compartiments, suivant une procédure déjà évoquée. La modélisation des systèmes dépourvus de mécanismes de rétroaction se fait souvent sous forme de graphes. Ces derniers sont le support de méthodes algorithmiques de traitement de données, méthodes appelées à des développements importants (Atlan). De ce fait, il importe de réagir contre l'emploi maladroit du diagramme sagittal et de préciser avec soin les attributs des éléments et la signification des relations. Ainsi en écologie, l'élément du schéma représente-t-il l'espèce, la grandeur relative d'une population ou la valeur numérique de celle-ci ? La flèche représente-t-elle une rencontre aléatoire ou traduit-elle la complexité réelle d'une relation donnée prédateur-proie ? Dans ce domaine, les analyses de Schaefer complètent les indications déjà publiées dans Aster. De nombreux raisonnements déductifs peuvent s'appuyer sur des graphes construits correctement.

Les systèmes plus complexes sont souvent modélisés sous la forme d'organigrammes (blocs-diagrammes). De nombreuses tentatives ont été faites pour traduire les isomorphismes à partir d'un modèle général de systèmes. Ceux de Le Moigne et Walliser semblent trop complexes pour la plupart des situations scolaires. Ils concernent plutôt le chercheur en didactique appelé à modéliser une face du système scolaire. Schaefer propose d'adopter et de normaliser un schéma général des systèmes à rétroaction et il l'applique avec succès à différents systèmes biologiques : régulation thermique, régulation de la teneur en eau de l'organisme etc... Les modélisations mathé-

matiques des systèmes proposées dans ces ouvrages sont rarement accessibles aux élèves du second degré. Dans la littérature analysée, les modèles matériels et iconiques sont à peine cités, alors qu'ils ont une grande importance en technologie (maquettes, dessin industriel) et qu'ils font partie de l'environnement habituel des élèves. Pour Shaw, cité par von Bertalanffy "il n'y a pas eu émergence de la théorie des systèmes à partir de l'analyse récente des systèmes technologiques." Mais pour l'enseignement, cette lacune est regrettable, car le va-et-vient entre biologie et technologie est historiquement très important à la fois par les apports réciproques des deux disciplines à la théorie des systèmes et les blocages qu'entraîne l'assimilation trop simple des systèmes biologiques aux systèmes techniques.

il semble souhaitable de définir des procédures de modélisation faisant apparaître des isomorphismes entre les disciplines

La construction d'un modèle n'épuise pas l'analyse systémique, même s'il s'agit d'un modèle explicatif. Il est indispensable de le faire fonctionner et de procéder à des simulations, pour éviter la dégradation du modèle en un objet dogmatique, faussé par des analogies douteuses, trop rigide pour s'appliquer à des champs conceptuels nouveaux. Le va et vient entre le domaine empirique et le domaine théorique décrit par Walliser a déjà été évoqué. Ces conditions ne sont pas réalisées dans le cadre d'un enseignement impositif limité au déroulement d'un programme linéaire.

L'analyse comparée des ouvrages cités permet de dégager certaines exigences pédagogiques même s'ils semblent parfois très éloignés de la réalité :

- l'approche systémique permet d'approfondir et d'actualiser l'apprentissage des méthodes expérimentales, de mieux cerner le rapport entre théorie et expérience, d'exploiter les possibilités dégagées par le développement de l'informatique ;
- elle conduit à un rapprochement de certaines disciplines par la modélisation de démarches communes et par l'extension du domaine logico-mathématique qui permet de traiter les données.

Victor HOST
Équipe de didactique des sciences
expérimentales, INRP